

SIMULASI GERAK PARTIKEL BERMUATAN DALAM PENGARUH MEDAN LISTRIK DAN INDUKSI MAGNET MENGGUNAKAN MATLAB VERSI 7.1

Much. Azam, Tomy Kusbramanto dan Jatmiko Endro Suseno

Lab Fisika atom dan inti , Fisika FMIPA UNDIP

ABSTRACT

Charged particle motion under external electric, magnetic induction, and electric-magnetic induction field simulation program has been made using MATLAB ver. 7.1 to get the visual description of charged particle motion. The simulation program is made based on non relativistic Lorentz equation. Each of charged particle's position and velocity components, which is moved under external electric and or induction magnetic field(s), is numerically computed using forth order Runge-Kutta method and be made visible by the simulation program. Proper test of the simulation program is made using known text book as the reference. Simulation results which made of 3D profile of charged particle's motion path and each velocity components has already shown that it have good relationship with the known text book

Keywords : charged particle motion, position, velocity

INTISARI

Telah dibuat program simulasi gerak partikel bermuatan dalam pengaruh medan listrik, medan induksi magnet, dan medan listrik-induksi magnet menggunakan bahasa pemrograman MATLAB versi 7.1 untuk mengetahui gambaran lintasan partikel setelah mendapat pengaruh dari medan listrik dan atau medan induksi magnet. Program simulasi dibuat berdasar persamaan Lorentz dalam ranah non-relativistik dan digunakan untuk menghitung besar masing-masing komponen kecepatan dan posisi partikel setelah mendapat pengaruh dari medan listrik dan atau medan induksi magnet luar dengan menggunakan metode Runge-Kutta orde 4 dalam MATLAB versi 7.1. Uji kesesuaian dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan referensi. Berdasarkan interpretasi hasil simulasi 3 dimensi diperoleh kesesuaian antara bentuk lintasan dan besar masing-masing komponen kecepatan hasil simulasi gerak partikel bermuatan dengan bentuk lintasan dan masing-masing komponen kecepatan gerak partikel bermuatan yang ada dalam referensi.

Kata kunci: gerak partikel bermuatan, posisi partikel, kecepatan partikel.

PENDAHULUAN

Salah satu aspek penting dalam elektromagnetisme skala makroskopik adalah bagaimana mendeskripsikan gerak partikel bermuatan dalam pengaruh medan listrik **E** dan atau medan magnet **B**. Efek-efek medan listrik **E** dan atau medan magnet **B** terhadap gerak partikel bermuatan memiliki aplikasi dalam perancangan devais penghasil partikel bermuatan yang memiliki energi kinetik tinggi. Devais penghasil partikel

bermuatan tersebut banyak digunakan dalam studi reaksi pada fisika nuklir dan pada fisika energi tinggi. Aplikasi luas lainnya dalam bidang astrofisika, geofisika, fisika plasma, magnetohidrodinamika, studi reaksi termonuklir [1].

Dewasa ini, studi dan aplikasi simulasi dalam bidang-bidang fisika di atas terus berkembang seiring perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi komputer dan

perangkat lunak. Simulasi gerak partikel bermuatan dalam pengaruh medan listrik \mathbf{E} dan atau medan induksi magnet \mathbf{B} dilakukan untuk mendapatkan informasi dan pemahaman tentang gerak partikel bermuatan tersebut (posisi, kecepatan, momentum, dan energi) secara kuantitatif. Hasil-hasil eksperimen yang memiliki kaitan erat dengan gerak partikel bermuatan dapat dibandingkan dengan karakteristik dinamika partikel bermuatan hasil program simulasi, misal: simulasi transpor elektron-foton pada bagian *head* akselerator SATURN 43 menggunakan kode program PENELOPE [2].

Pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk mendapatkan gambaran gerak partikel bermuatan, baik dari segi posisi dan arah kecepatannya, dalam pengaruh medan listrik \mathbf{E} dan atau medan induksi magnet \mathbf{B} dengan menggunakan MATLAB versi 7.0.1

DASAR TEORI

Gerak Partikel Bermuatan Dalam Medan Elektromagnetik

Wangsness (1986) menyatakan bahwa persamaan gerak non-relativistik sebuah partikel bermuatan q dan memiliki posisi \mathbf{r} dalam medan elektromagnetik dinyatakan oleh gaya Lorentz [1]:

$$m_0 \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

dengan $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$; $|\mathbf{v}| \ll c$, \mathbf{E} , \mathbf{B} , dan m_0 , berturut-turut mewakili kecepatan partikel; dengan syarat besar kecepatan \mathbf{v} sangat kecil dibandingkan laju cahaya dalam ruang vakum c , medan listrik, medan induksi magnet, dan massa partikel bermuatan tanpa memperhitungkan efek relativistik. Persamaan (1), secara umum, dapat digunakan untuk mendeskripsikan gerak partikel bermuatan dalam pengaruh medan listrik eksternal dengan mengabaikan emisi radiasi yang dihasilkan oleh gerak partikel bermuatan tersebut [3].

Gerak partikel bermuatan dalam medan listrik \mathbf{E} dan induksi magnet \mathbf{B} statik dan homogen

Kedua medan elektromagnetik dalam persamaan (1), yaitu \mathbf{E} dan \mathbf{B} , diasumsikan tidak sama dengan nol, $\mathbf{E} \neq 0$ dan $\mathbf{B} \neq 0$, dan juga tak gayut posisi dan waktu. Apabila masing-masing komponen kecepatan \mathbf{v} dan \mathbf{E} diuraikan dalam komponen yang sejajar (\parallel) dan tegak lurus (\perp) terhadap medan induksi magnet \mathbf{B} , maka persamaan (1) menjadi :

$$m_0 \frac{d\mathbf{v}_{\parallel}}{dt} + m_0 \frac{d\mathbf{v}_{\perp}}{dt} = q(\mathbf{E}_{\parallel} + \mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

karena $\mathbf{v}_{\parallel} \times \mathbf{B} = 0$.

Persamaan (2) menghasilkan persamaan-persamaan:

$$m_0 \frac{d\mathbf{v}_{\parallel}}{dt} = q\mathbf{E}_{\parallel}, \quad (3)$$

dan

$$m_0 \frac{d\mathbf{v}_{\perp}}{dt} = q(\mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B}) \quad (4)$$

Gerak partikel bermuatan dalam medan induksi magnet \mathbf{B} gayut waktu, medan listrik $\mathbf{E} = 0$

Sebuah partikel bermuatan di'batasi' bergerak menempuh suatu lintasan yang berbentuk lingkaran berjari-jari R yang melingkupi medan induksi magnet yang memiliki kesimetrian silindris, $\mathbf{B} = B_z \hat{\mathbf{z}}$, yang tegak lurus terhadap bidang orbit partikel bermuatan tersebut. Medan induksi magnet \mathbf{B} divariasi terhadap waktu sehingga kerja pada partikel bermuatan tersebut, untuk setiap satu putaran penuh, sama dengan perkalian muatannya dengan gaya elektromotif imbas \mathcal{E}_{ind} :

$$\mathcal{E}_{\text{ind}} = \oint \mathbf{E}_{\text{ind}} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\pi R^2 \frac{d\langle B_z \rangle}{dt} \quad (5)$$

dengan $\langle B_z \rangle$ menyatakan nilai rata-rata besar induksi magnet \mathbf{B} pada suatu luasan yang dilingkupi oleh orbit lintasan partikel bermuatan tersebut. Medan listrik imbas

$\mathbf{E}_{\text{ind}} = E_{\varphi} \hat{\boldsymbol{\phi}}$ dan integral dalam persamaan (5) bernilai $2\pi R E_{\varphi}$ karena kesimetrian silindris medan induksi magnet $\mathbf{B} = B_z \hat{\mathbf{z}}$, sehingga besar medan listrik imbas $|\mathbf{E}_{\text{ind}}|$ dinyatakan oleh:

$$E_{\varphi} = \frac{1}{2} R \frac{d\langle B_z \rangle}{dt}, \quad (6)$$

dan gaya tangensial akibat medan listrik imbas \mathbf{E}_{ind} adalah sebesar:

$$f_{\varphi} = qE_{\varphi} = \frac{1}{2} qR \frac{d\langle B_z \rangle}{dt} = m_0 \frac{dv_{\varphi}}{dt}. \quad (7)$$

Metode Runge-Kutta

Koonin (1986) menyatakan bahwa salah satu metode pengintegralan persamaan-persamaan diferensial dalam fisika komputasi yang terkenal tepat dan digunakan secara luas adalah metode Runge-Kutta. Terdapat beberapa bentuk orde metode Runge-Kutta, masing-masing dengan kelemahan dan keakuratannya sendiri-sendiri. Fungsi f dalam [4]:

$$y_{n+1} = y_n + \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x, y) dx, \quad (8)$$

dihampiri menggunakan penderetan Taylor pada titik tengah interval integrasi untuk mendapatkan orde kedua dari metode Runge-Kutta sehingga didapat :

$y_{n+1} = y_n + hf(x_n + \frac{1}{2}, y_n + \frac{1}{2}) + O(h^3)$ (9)
galat (*error*) muncul dari suku kuadrat dalam penderetan Taylor fungsi f sedangkan pengintegrasian suku linear berharga nol. Bila didefinisikan k sebagai hampiran tengah terhadap beda antara $y_{n+\frac{1}{2}}$ dan y_n , prosedur dua-langkah berikut menghasilkan nilai y_{n+1} dengan menggunakan nilai-nilai y_n :

$$k = hf(x_n, y_n) \quad (10)$$

$$y_{n+1} = y_n + hf(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k) + O(h^3) \quad (11)$$

Persamaan (11) merupakan algoritma Runge-Kutta orde kedua. Algoritma Runge-Kutta orde keempat dinyatakan

sebagai berikut, dengan menggunakan k_i sebagai variabel menengah:

$$k_1 = hf(x_n, y_n)$$

$$k_2 = hf(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_1)$$

$$k_3 = hf(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_2)$$

$$k_4 = hf(x_n + h, y_n + k_3)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) + O(h^5). \quad (12)$$

METODE PENELITIAN

Perancangan program simulasi gerak partikel bermuatan

Sebelum dilakukan perancangan program terlebih dahulu diidentifikasi data masukan dan data keluaran. Perancangan program simulasi ini menggunakan MATLAB 7.1 dan terdiri dari beberapa m-file program, antara lain:

a. Program utama ta.m

Program ta.m berisi kode GUI (*Graphical User Interfaces*) menu program utama simulasi, dan juga memanggil program perhitungan posisi dan kecepatan partikel bermuatan yang disimulasikan (persGerak.m), dan program penampil hasil simulasi (hasil.m).

b. Program perhitungan \mathbf{r} dan \mathbf{v} partikel bermuatan persGerak.m

persGerak.m berfungsi untuk menyelesaikan persamaan gerak partikel bermuatan dalam medan elektromagnetik luar (persamaan Lorentz).

c. Program hasil.m

Kode hasil.m digunakan untuk menampilkan hasil simulasi gerak partikel bermuatan dalam medan elektromagnetik luar

Tes dan koreksi program

Tes dan koreksi program merupakan tahap pemeriksaan program yang meliputi pemeriksaan *statement* penulisan untuk menghindari *listing error*, pemeriksaan logika atau prosedural langkah untuk menghindari *logic error*, dan pemeriksaan

data masukkan/keluaran untuk menghindari *data error*.

Pengolahan Data Simulasi Gerak Partikel Bermuatan

Data simulasi gerak partikel bermuatan yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sintetis yang didapat dari contoh aplikasi program simulasi gerak partikel bermuatan (proton) dalam pengaruh medan elektromagnetik luar yang meliputi medan \mathbf{E} statik dan homogen, medan $\mathbf{B} = 0$; medan \mathbf{B} statik dan homogen, medan $\mathbf{E} = 0$; medan \mathbf{E} dan \mathbf{B} statik dan homogen; medan $d\mathbf{B}/dt$ dan medan $\mathbf{E} = 0$, sehingga didapatkan tampilan lintasan partikel bermuatan (proton) dalam tiga dimensi dan grafik hubungan masing-masing komponen kecepatan proton terhadap waktu.

Pengujian Kesesuaian Hasil

Hasil simulasi gerak partikel bermuatan, berupa wujud lintasan, posisi, dan besar masing-masing komponen kecepatannya perlu dibandingkan dengan wujud lintasan gerak, besar masing-masing komponen posisi, dan kecepatan partikel bermuatan yang ada dalam referensi.

Intepretasi Hasil Simulasi Gerak

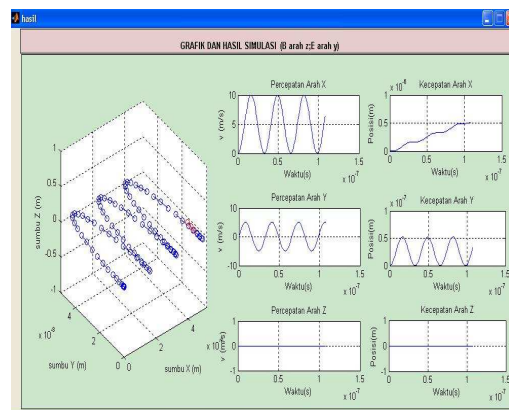
Tampilan posisi partikel bermuatan (proton) dalam tiga dimensi dan grafik hubungan besar masing-masing komponen kecepatannya terhadap waktu yang didapatkan dari program simulasi gerak partikel bermuatan (proton) dalam pengaruh medan elektromagnetik luar diinterpretasikan sehingga didapat karakteristik gerak partikel bermuatan (proton) dalam pengaruh medan elektromagnetik luar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gerak Partikel Bermuatan Dalam Medan Listrik \mathbf{E} dan Induksi Magnet \mathbf{B} Statik dan Homogen

Pada simulasi gerak partikel bermuatan dalam medan listrik \mathbf{E} dan

medan induksi magnet \mathbf{B} statik dan homogen, data masukan didapat dengan memilih opsi E_y dan $E_0 = 10 \text{ V/m}$ dalam kotak Medan Listrik, dan dengan memilih opsi B_z dan $B_0 = 2 \text{ T}$ dalam kotak Medan Magnet seperti yang diperlihatkan dalam gambar 1. Oleh karena itu, didapat medan listrik $\mathbf{E} = E\hat{y}$ dan medan induksi magnet $\mathbf{B} = B\hat{z}$ yang saling tegak lurus satu sama lain. Lintasan gerak partikel bermuatan yang diperlihatkan dalam gambar 3 berbentuk sikloid biasa (*ordinary cycloid*) yang berarah \hat{x} . Hal tersebut disebabkan oleh adanya kontribusi kecepatan hanyut $\mathbf{v}_D = E\hat{y} \times B\hat{z} / B^2 = E\hat{x} / B$ dalam komponen kecepatan pada sumbu x , $v_x \hat{x}$. Komponen kecepatan pada sumbu z pada hasil simulasi, V_z , tetap berharga nol karena $\mathbf{v}_{\parallel} \times \mathbf{B} = 0$.

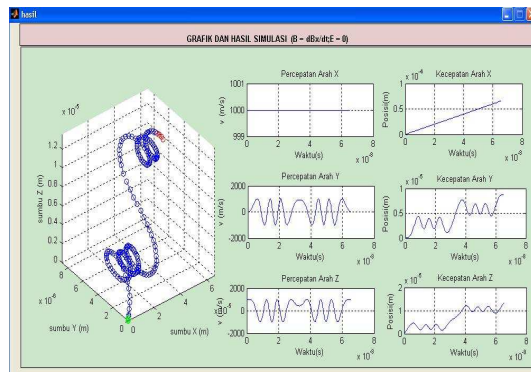


Gambar 1 Hasil simulasi gerak partikel bermuatan dalam medan listrik \mathbf{E} dan medan induksi magnet \mathbf{B} statik dan homogen

Gerak Partikel Bermuatan Dalam Medan Induksi Magnet \mathbf{B} Gayut Waktu, Medan Listrik $\mathbf{E} = 0$

Komponen kecepatan pada sumbu x pada hasil simulasi 2 bernilai 0 m/s selama waktu simulasi karena V_x sejajar dengan medan induksi magnet gayut waktu. Akibat perubahan arah dan besar medan induksi magnet \mathbf{B} terhadap waktu, gerak melingkar partikel bermuatan yang disimulasikan juga mengalami perubahan arah gerak melingkar. Saat medan induksi magnet makin bernilai maksimum positif

10 T, atau dengan kata lain saat berarah \hat{x} , arah gerak melingkar partikel bermuatan berlawanan arah jarum jam sedangkan saat medan induksi magnet makin bernilai maksimum negatif -10 T, atau dengan kata lain saat berarah $-\hat{x}$, arah gerak melingkar partikel bermuatan searah jarum jam.



Gambar 2. Hasil simulasi gerak partikel bermuatan dalam medan induksi magnet \mathbf{B} gayut waktu

KESIMPULAN

Berdasarkan intepretasi hasil uji simulasi terdapat kesesuaian antara bentuk lintasan dan besar masing-masing komponen kecepatan hasil simulasi gerak

partikel bermuatan dalam pengaruh medan listrik dan induksi magnet dengan bentuk lintasan dan besar masing-masing komponen kecepatan gerak partikel bermuatan yang ada dalam referensi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Wangsness, R.K. 1986. *Electromagnetic Fields*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc
- [2] Salvat, F., Fernández-Varea, J.M. and Sempau J. 2003. *PENELOPE, a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport*. Facultat de Física (ECM), Universitat de Barcelona: Barcelona
- [3]. Jackson, J.D. 1975. *Classical Electrodynamics*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Koonin, S.E. 1986. *Computational Physics*. Redwood City, California: Addison-Wesley Publishing Company, Inc
- [5] Halliday, D. dan Resnick R. 1990. *Fisika*. Jilid 2. Edisi ke-3 (terjemahan). Jakarta: Erlangga

